

풍력발전기용 복합재 윈드터빈 블레이드의 구조해석 및 실험

정 성 훈* · 박 지 상* · 김 태 욱*

Structural Analysis and Test of Composite Wind Turbine Blade

Sung-Hoon Jung, Ji-Sang Park and Tae-Wook Kim

Abstract

The purpose of this study is to define the optimized layer pattern of composite wind turbine blade by using a commercial FEM program and to perform the fatigue test of T-Bolt. FEM analysis is done by using a PATRAN and ABAQUS to get a information about stress distribution ,critical deformation shape and get a critical load factor in local buckling analysis. As a result of the linear and nonlinear structural analysis, layer pattern of blade was optimized. T-Bolt is a connecting part of wind turbine blade and rotor hub, therefore T-bolt is cirtical part of wind turbine blade. T-bolt fatigue test is conducted to get a information of life cycle of T-bolt. The test is done by using a hydraulic actuator system

Key Words: Wind Turbine Blade, Finite Element Method, Structural Analysis, Fatigue test

1. 서 론

풍력발전은 100여년 전부터 시작된 후(1), 선진국에서는 3MW급 이상의 초대형 풍력발전 시스템이 상용화 되고 있다. 국내에서도 무공해 자원인 풍력에너지의 잠재성을 인식하고 이를 이용하기 위한 노력을 기울이고 있으며, 그러한 시도의 하나로서 750kW 급 풍력발전 시스템을 개발 중이다.

풍력 블레이드는 최초에는 금속 및 목재를 사용하였지만, 풍력블레이드가 점차 대형화 되면서 제작 및 요구조건을 기존의 재료로는 감당할 수가 없게 되었다. 20세기에 들어서 섬유강화 복합재료에 대한 연구가 본격적으로 진행되면서, 최근 풍력블레이드에 복합재료가 가장 큰 비율을 차지하고 있다. 복합재료는 가볍고 강하기 때문에 풍력블레이드를 만드는 데 필요한 요구조건을 만족한다고 할 수 있다. 하지만 이러한 복합재료

를 잘 사용하기 위해서는 재료의 기계적인 특성을 잘 파악하고 적용시켜야 하기 때문에, 구조해석 및 실험을 통하여 재료를 검증하고 설계하는 것은 필수적인 요소라고 할 수 있다.

본 연구에서는 복합재료 풍력 블레이드의 최적 설계를 위하여 선형/비선형 해석을 수행하였으며, 이에 따른 최적의 결과를 Layer Pattern 으로 결정하였다. 또한 T-Bolt의 피로하중시험을 통하여 T-Bolt 연결부의 피로하중에 대한 안정성을 검증하였다.

2. 블레이드의 재료 및 Layer 형상

2.1 블레이드 재료의 물성

블레이드에 사용된 재료는 크게 3가지로서, UD glass fiber, Fabric glass fiber 그리고 Balsa wood 이다. 재료의 물성값은 Table 1에 나와 있다. 본 연구에서 제작하는 블레이드는 Hand Lay up 방식으로 블레이드를 제작하지 않고, Infusion Molding 기법을 사용하여 제작하기 때문에 일반적인 Prepreg의 물성값과는 약간 다르다.

* 한국기계연구원

Table 1. Material properties

	UD	Fabric	Balsa
E_1	29.5 GPa	21.1 GPa	0.105 GPa
E_2	8.55 GPa	21.1 GPa	0.105 GPa
G_{12}	1.5 GPa	2.0 GPa	0.04 GPa
ρ	1890 kg/m ³	1880 kg/m ³	150 kg/m ³
S_t	700 MPa	420 MPa	-

2.2 블레이드의 Layer up Pattern

블레이드의 기본 적층순서는 Fig. 1에 나와있다.

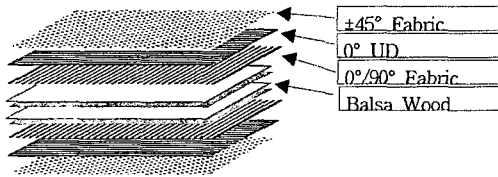


Fig. 1 Blade의 적층순서

±45° Fabric층은 비틀림에 의한 하중을 지지하는 역할을 하며, 0° UD층의 경우 블레이드의 축방향으로 작용하는 굽힘모멘트를 지탱하는 역할을 하며, 0°/90° Fabric의 경우 Blade의 축방향과 수직하게 작용하는 하중을 지탱하는 역할을 한다. Balsa wood의 경우 직접적인 하중을 지탱하는 역할보다는 굽힘강성을 증가시키고 동시에 좌굴하중의 증가에 목적이 있다.

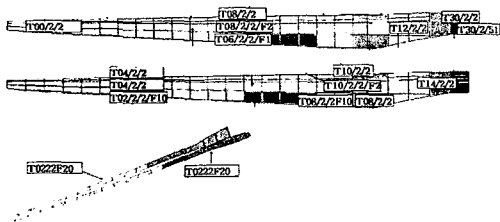


Fig. 2 Blade의 전체 Layer Pattern

각 층 별 특성을 적용하여 제작한 블레이드 전체의 Layer Pattern은 Fig. 2의 형상과 같으며, 블레이드의 무게는 약 2300 kg 이다. Layer Pattern을 설계의 기본 원칙은 가장 큰 모멘트를 받는 루트 부위를 가장 두껍게 하며, 블레이드 끝단으로 갈수록 얇아지도록 하는 것이다.

3. 블레이드의 구조해석

3.1 블레이드에 적용된 하중

블레이드의 구조해석을 위해서는 블레이드에 작용하는 적절한 하중의 선택이 필요하다. 블레이드에 작용하는 하중의 크기는 블레이드의 형상 및 풍속 조건등에 의하여 결정되며 IEC에 의하여 DLC(Design Load Case)(2)로 규정되어 있다. 각각의 하중조건에 따라 블레이드의 부위별 적용 하중등이 모두 다르기 때문에 이를 모두 고려한 구조설계가 수행되어야 한다. 본 연구에서 수행한 하중조건은 DLC 1.9(Extreme coherent gust)로서 정격출력 풍속에서 돌풍이 불어올 때의 상황에 대한 풍속하중이며 그 하중의 형상 및 크기는 다음의 Fig. 3과 같다.

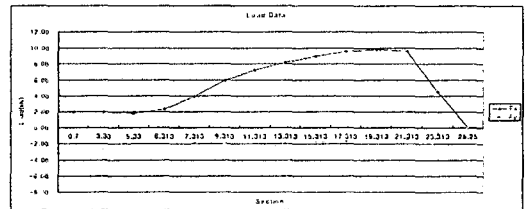


Fig. 3 DLC 1.9의 풍속조건

3.2 블레이드의 모델링

블레이드의 구조해석을 위하여 모두 8347개의 Node, 8583개의 Shell S4 Element가 사용되었다. Cylindrical coordinate을 이용하여, 모델링을 마친 Blade의 형상은 Fig. 4와 같다. 블레이드의 Flap 방향은 X 축, Chord 방향은 Y축이며, 블레이드의 길이방향은 Z 축으로 구성되어 있다.

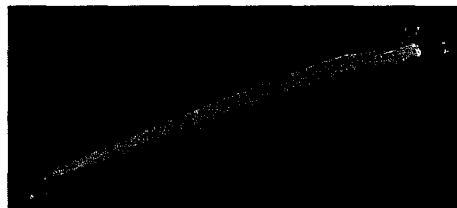


Fig. 4 블레이드의 형상

3.2 블레이드의 선형 해석

Fig. 5는 DLC 1.9 를 적용시켜서 블레이드의 선형해석을 수행한 블레이드의 UD층의 응력분포 형상이다. 블레이드에서 가장 주요하게 작용하는 하중은 블레이드의 굽힘모멘트에 의하여 발생하는 축방향 하중으로서, 이를 지탱하는 UD 층의 응력분포도를 유심히 살펴봐야 한다.

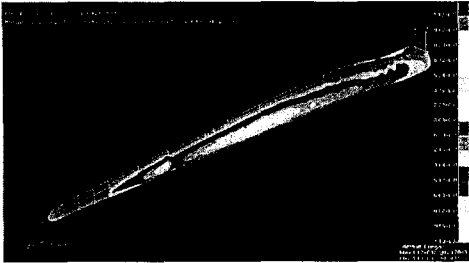


Fig. 5 블레이드의 응력분포

응력의 분포형상의 경우 응력의 크기는 Upper Skin에서 압축하중 / Lower Skin에서 인장하중이 적용되는 형상이며, 이 상황에서의 블레이드의 변위는 2.7m 이고 최대응력은 112MPa 로서 블레이드의 중간부분이다. 블레이드에 가장 극심한 변형을 가져올 수 있는 극한풍속 조건에서 최대응력의 크기가 112 MPa 이기 때문에 이 값은 재료의 극한강도의 16% 수준이다.(3) 즉 재료의 강도에 따른 블레이드의 파괴는 극한 풍속조건에서도 발생하지 않는다는 결론을 내릴 수 있다.

3.2 블레이드의 좌굴해석

풍력블레이드는 길이가 약25m의 대형구조물이며, 구조물의 강도에 의한 선형해석 외의 구조물의 변형에 의한 국부좌굴 현상시의 하중의 감당능력을 조사할 필요가 있다.



Fig. 6 국부좌굴 발생 시 형상

Fig. 6은 국부 좌굴이 발생 했을 때의 블레이드를 확대한 형상이다. 좌굴은 블레이드의 루트부위 근처에서 발생하였으며 그 원인은 발생부위의 형상이 블레이드에서 상대적으로 가장 형상이 급격하게 변하는 부위이기 때문인 것으로 추정된다. 좌굴이 발생하였을 때의 하중의 크기는 적용하중의 1.79배일 때 발생하였으며, 좌굴 발생 부위에서의 Node의 Critical Load Factor 에 따른 응력의 변화를 Fig. 7과 Fig. 8에서 보여주고 있

다. Fig. 7은 Upper UD Layer 에서의 응력의 변화를 보여주고 있고, Fig. 8은 Lower Layer 에서의 응력의 변화를 보여주고 있다.

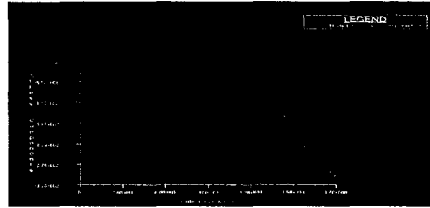


Fig. 7 Upper Layer UD의 응력 변화

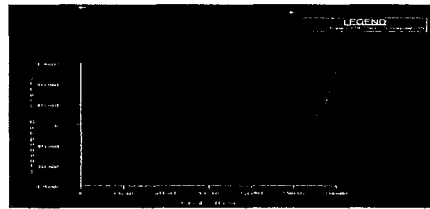


Fig. 8 Lower Layer UD의 응력 변화

그래프의 결과를 살펴보면 같은 부위의 Node 라도 Layer에 따라서 좌굴이 발생하기 전까지는 비슷한 응력변화의 양상을 보이다가 좌굴 하중으로 갈수록 Upper Layer의 UD는 압축 하중이 더 강하게 작용되고, Lower Layer의 UD는 인장하중으로 전환됨을 알 수 있다.

4. T-Bolt의 피로하중 시험

3.1 T-Bolt 연결부의 형상 및 적용 하중

T-Bolt는 블레이드 루트와 허브를 연결하는 부분으로서(Fig. 9) 블레이드의 운용 중 지속적인 인장/압축하중을 받기 때문에 피로하중시험을 통한 안정성에 대한 자료를 확보하는 것이 필수적이다. T-Bolt의 재료 및 연결부의 극한 하중값은 풍력하중 해석을 적용시킨 값보다 훨씬 크기 때문에 일반적인 정하중 해석은 큰 의미가 없다고 할 수 있으며, 실제 블레이드가 운용되는 상황과 유사한 피로하중시험을 통하여 T-Bolt 연결부에 대한 안정성이 확보되어야 한다. 일반적인 정상 운용 상태에서의 풍력블레이드의 Life Cycle은 10^8 - 10^9 이지만(4) 실제 실험을 수행하기에는 너무나 많기 때문에 사이클을 줄이고 하중을 높여서 실험을 할 필요가 있다. 풍력 및 원심력에 의

하여 가장 극심한 하중이 걸리는 구간의 하중인 11ton을(Fig. 9) 피로하중에 적용할 하중으로 선정하였으며, 전체 1×10^5 Cycle을 수행하였다.

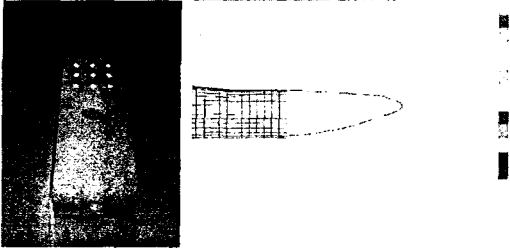
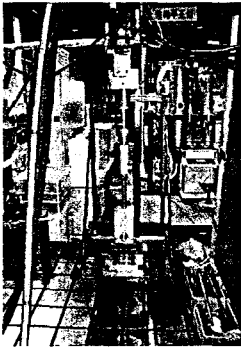


Fig. 9 T-Bolt 연결부 시편 형상 및 하중분포도

3.2 T-Bolt 피로하중 시험 및 결과



시험에 사용된 장비는 유압 액추에이터로 작동되는 MTS System을 사용하였으며, 일반적인 사양은 250kN의 하중, 250mm의 작동범위를 가지고 있다. 장비를 세팅한 형상은 Fig. 10과 같다. 하중 제어를 이용하여 목표하중을 500 kgf

Fig. 10 시험세팅형상 - 11000 kgf로 하고, 3Hz의 진동수로 주기적인 하중을 가하였다.

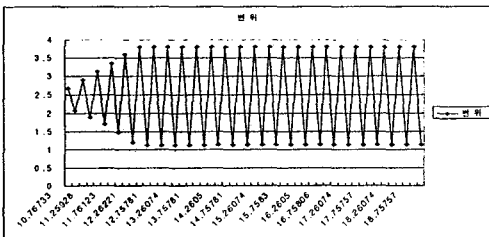


Fig. 11 시간에 따른 변위 Cycle 그래프

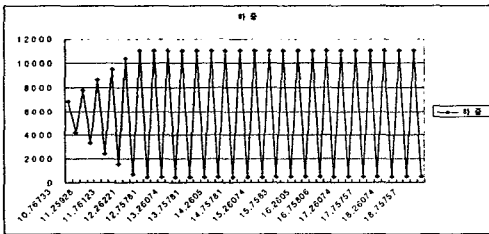


Fig. 12 시간에 따른 하중 Cycle 그래프

Fig. 11과 Fig. 12 는 시험 결과를 시간에 따른

하중 및 변위로 기록한 값이며, 하중 및 변위가 일정한 진폭을 따라서 왕복하는 것을 볼 수 있다. 극한 돌풍조건상의 가혹한 조건으로 피로하중시험을 수행한 결과, 시편 자체의 영구변형 및 크랙은 발생하지 않았다. 피로하중 시험을 통하여, 실제 T-Bolt의 운용상황에서의 안정성에 대한 검증 및 실험결과를 Database화 할 수 있었고 차후의 연구에 적용할 수 있게 되었다.

5. 결론

본 연구에서는 750 kW급 복합재 윈드터빈 블레이드에 대한 기본적인 Layer 형상 설계 및 구조 해석을 수행하였다. 실제로 다양한 Layer Pattern을 설정한 후 이에 관한 응력분포 및 변형에 관한 선형 정적 해석 및 좌굴하중에 관한 해석을 수행하면서 Layer Pattern을 수정 후, 가장 목적에 부합하는 형상을 결정하였다. 또한 T-Bolt의 피로하중 시험을 통하여, 실물 블레이드에 연결되는 T-Bolt 연결부위의 피로하중에 대한 안정성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지 관리공단의 '풍력발전 시스템용 복합재 블레이드의 구조설계 및 시험평가'의 일환으로 수행된 연구임

참고문헌

- (1) Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, 2001, Handbook of wind energy, pp 1~6
- (2) IEC Standard 61400-1, 2000, International Standard, 7.4, Design situations and load cases
- (3) IEC Standard 61400-1, 2000, International Standard, 7.6, Ultimate limit state analysis
- (4) David A. Spera, 1994, Wind Turbine Technology, pp 547~549